00	06/02/2026	Prima emissione	M. Sergenti	A. Scognetti	C. Di Michele
N.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONI	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
CODIFICA ELABORATO			PROGER		

Marco Sergenti
10.02.2026 14:46:24
GMT+00:00

Risposta alle richieste di integrazioni

Registro Ufficiale.U.0013752.22-09-2025

VALUTAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO ACUSTICO - Fase di cantiere

CONTENUTI TECNICI

Nuovo Elettrodotto aereo 132 kV CP Piadena-CP Cella Dati

REVISIONI					
	00	06/02/2026	Prima emissione	F. Felli SVP-SA-SANO	V. De Santis SVP-SA-SANO
	N.	DATA	DESCRIZIONE	ESAMINATO	ACCETTATO

NUMERO E DATA ORDINE: 4000105988 del 04.03.2024

MOTIVO DELL'INVIO: ☑ PER ACCETTAZIONE ☐ PER INFORMAZIONE

CODIFICA ELABORATO	
REBX18096B3236679	Terna Rete Italia TERNA GROUP

Questo documento contiene informazioni di proprietà Terna Rete Italia S.p.A. e deve essere utilizzato esclusivamente dal destinatario in relazione alle finalità per le quali è stato ricevuto. È vietata qualsiasi forma di riproduzione o di divulgazione senza l'esplicito consenso di Terna Rete Italia S.p.A.

This document contains information proprietary to Terna Rete Italia S.p.A. and it will have to be used exclusively for the purposes for which it has been furnished. Whichever shape of spreading or reproduction without the written permission of Terna Rete Italia S.p.A. is prohibited.

SOMMARIO

1 DEFINIZIONI TECNICHE 3
2 CRITERI DI VALUTAZIONE 8
2.1 I LIMITI ASSOLUTI DI ZONA 8
2.2 IL CRITERIO DIFFERENZIALE 11
2.2.1 Generalità 11
Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo 12
Circolare 6 settembre 2004 del Ministero dell'Ambiente. 12
3 TEORIA DELL'INTENSITÀ SONORA. 14
3.1.1 Rilievo dell'intensità sonora. 16
3.1.2 Limitazioni nel rilievo dell'intensità sonora. 21
3.1.3 Applicazioni dell'intensità sonora. 25
3.1.4 Le misure eseguite sulle sorgenti 29
4 MODELLISTICA MATEMATICA SUL RUMORE 31
4.1 GRANDEZZE CONSIDERATE AI FINI DELL'ATTENUAZIONE ACUSTICA 31
4.2 SPECIFICHE DEL MODELLO MATEMATICO USATO 34
4.2.1 Tecnica di ritracciamento dei raggi (Raytracing) 34
4.2.2 Le tipologie di sorgenti 36
4.2.3 La diffrazione degli ostacoli 37
4.2.4 L'assorbimento di elementi 39
4.2.5 Quote di calcolo delle mappe. 39
4.3 RIFERIMENTI NORMATIVI DEL MODELLO UTILIZZATO 40
5 ACCURATEZZA DELLE MISURE E DELLE SIMULAZIONI 41
5.1 ACCURATEZZA DELLE MISURE ACUSTICHE 41
5.1.1 Incertezza dello strumento 41
5.1.2 Incertezza della parte microfonica 41
5.1.3 Variabilità delle condizioni emissive della sorgente 41
5.1.4 Variabilità delle condizioni atmosferiche 42
5.1.5 Direttività dell'onda acustica incidente. 42
5.1.6 Campo sonoro nel punto di misura 42
5.1.7 Calcolo delle incertezze associate alle misure 42
5.2 ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI ACUSTICHE 43
5.2.1 Tipo di modello e utilizzo dello stesso 43
5.2.2 Dati di potenza sonora delle sorgenti 44
5.2.3 Dati non considerati nei modelli. 44
5.2.4 Inserimento dati morfologici 44
5.2.5 Riferimenti normativi del modello. 44
5.2.6 Scelta dei parametri di calcolo 46
5.2.7 Calcolo delle incertezze associate alle simulazioni. 46
5.3 MIGLIORAMENTO DELL'ACCURATEZZA 47
5.4 QUALI PARAMETRI MISURARE 48
5.5 LA DURATA DELLE MISURE 48
5.6 IL LIVELLO DI ACCURATEZZA 49

1 DEFINIZIONI TECNICHE

Inquinamento acustico

Introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo ed alle altre attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi.

Ambiente abitativo

Ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o comunità ed utilizzato per le diverse attività umane; vengono esclusi gli ambienti di lavoro salvo quanto concerne l'immissione di rumore da sorgenti esterne o interne non connesse con attività lavorativa propria.

Ambiente di lavoro

E' un ambiente confinato in cui operano uno o più lavoratori subordinati, alle dipendenze sotto l'altrui direzione, anche al solo scopo di apprendere un'arte, un mestiere od una professione.

Sono equiparati a lavoratori subordinati i soci di enti cooperativi, anche di fatto, e gli allievi di istituti di istruzione o laboratori-scuola.

Rumore

Qualunque emissione sonora che provochi sull'uomo effetti indesiderati, disturbanti o dannosi o che determini un qualsiasi deterioramento qualitativo dell'ambiente.

Sorgente sonora

Qualsiasi oggetto, dispositivo, macchina, impianto o essere vivente, atto a produrre emissioni sonore.

Sorgente specifica

Sorgente sonora selettivamente identificabile che costituisce la causa del potenziale inquinamento acustico.

Tempo a lungo termine (T_L)

Rappresenta un insieme sufficientemente ampio di T_R all'interno del quale si valutano i valori di attenzione. La durata di T_L è correlata alle variazioni dei fattori che influenzano la rumorosità a lungo periodo.

Tempo di riferimento (T_R)

Rappresenta il periodo della giornata all'interno del quale si eseguono le misure. La durata della giornata è articolata in due tempi di riferimento: quello diurno compreso tra le ore 6.00 e le ore 22.00 e quello notturno compreso tra le ore 22.00 e le ore 6.00.

Tempo di osservazione (To)

E' un periodo di tempo compreso in T_R nel quale si verificano le condizioni di rumorosità che si intendono valutare.

Tempo di misura (T_M)

All'interno di ciascun tempo di osservazione, si individuano uno o più tempi di misura (T_M) di durata pari o minore del tempo di osservazione, in funzione delle caratteristiche di variabilità del rumore ed in modo tale che la misura sia rappresentativa del fenomeno.

Livelli dei valori efficaci di pressione sonora ponderata "A" L_{AS}, L_{AF}, L_{AI}

Esprimono i valori efficaci in media logaritmica mobile della pressione sonora ponderata "A" L_{pA} secondo le costanti di tempo "slow", "fast", "impulse".

Livelli dei valori massimi di pressione sonora L_{ASmax}, L_{AFmax}, L_{AImax}

Esprimono i valori massimi della pressione sonora ponderata in curva "A" e costanti di tempo "slow", "fast", "impulse".

Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A"

Valore del livello di pressione sonora ponderata "A" di un suono costante che, nel corso di un periodo specificato T, ha la medesima pressione quadratica media di un suono considerato, il cui livello varia in funzione del tempo

$$L_{Aeq,T} = 10\log\frac{1}{t_2 - t_1}\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt \qquad dB(A)$$

dove L_{Aeq} è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" considerato in un intervallo di tempo che inizia all'istante t_1 e termina all'istante t_2; $P_{A(t)}$ è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata "A" del segnale acustico in Pascal (Pa); p_o 20 Pa è la pressione sonora di riferimento.

Livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo al tempo a lungo termine TL ($L_{A,qTL}$)

Il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo al tempo a lungo termine (L_{AeqTL}) può essere riferito:

- al valore medio su tutto il periodo, con riferimento al livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" relativo a tutto il tempo TL, espresso dalla relazione

$$L_{Aeq,TL} = 10\log\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} 10^{0.1(L_{Aeq,Tr})}\right] \qquad dB(A)$$

essendo N i tempi di riferimento considerati.

- al singolo intervallo orario nei TR. In questo caso si individua un TM di 1 ora all'interno del TO nel quale si svolge il fenomeno in esame. ($L_{Aeq,TL}$) rappresenta il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata "A" risultante dalla somma degli M tempi di misura TM, espresso dalla seguente relazione:

$$L_{Aeq,TL} = 10\log\left[\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} 10^{0.1(L_{Aeq,TM})_i}\right] \qquad dB(A)$$

dove i è il singolo intervallo di 1 ora nell' i-esimo TR.

E' il livello che si confronta con i limiti di attenzione.

Livello sonoro di un singolo evento L_{AE}, (SEL)

E' dato dalla formula

$$SEL = L_{AE} = 10\log\left[\frac{1}{t_0}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt\right] \qquad dB(A)$$

dove:

$t_2 - t_1$ è un intervallo di tempo sufficientemente lungo da comprendere l'evento;

t_0 è la durata di riferimento (1 s)

Livello di rumore ambientale (L_A)

E' il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A", prodotto da tutte le sorgenti di rumore esistenti in un dato luogo e durante un determinato tempo. Il rumore ambientale è costituito dall'insieme del rumore residuo e da quello prodotto dalle specifiche sorgenti disturbanti, con l'esclusione degli eventi sonori singolarmente identificabili di natura eccezionale rispetto al valore ambientale della zona. E' il livello che si confronta con i limiti massimi di esposizione:

1) nel caso dei limiti differenziali, è riferito a T_M
2) nel caso di limiti assoluti è riferito a T_R

Livello di rumore residuo (L_R)

E' il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A", che si rileva quando si esclude la specifica sorgente disturbante. Deve essere misurato con le identiche modalità impiegate per la misura del rumore ambientale e non deve contenere eventi sonori atipici.

Livello differenziale di rumore (L_D)

$$L_D = (L_A - L_R) \qquad dB(A)$$

Livello di emissione

E' il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A", dovuto alla sorgente specifica. E' il livello che si confronta con i limiti di emissione.

Fattore correttivo (K_i)

E' la correzione in dB(A) introdotta per tenere conto della presenza di rumori con componenti impulsive, tonali o di bassa frequenza il cui valore è di seguito indicato:

- per la presenza di componenti impulsive $K_I = 3$ dB
- per la presenza di componenti tonali $K_T = 3$ dB
- per la presenza di componenti in bassa frequenza $K_B = 3$ dB

I fattori di correzione non si applicano alle infrastrutture dei trasporti.

Presenza di rumore a tempo parziale

Esclusivamente durante il tempo di riferimento relativo al periodo diurno, si prende in considerazione la presenza di rumore a tempo parziale, nel caso di persistenza del rumore stesso per un tempo totale non superiore ad un'ora. Qualora il tempo parziale sia compreso in 1 ore il valore del rumore ambientale, misurato in Leq(A) deve essere diminuito di 3 dB(A); qualora sia inferiore a 15 minuti il Leq(A) deve essere diminuito di 5 dB(A).

Livello di rumore corretto (L_C)

E' definito dalla relazione

$$L_C = L_A + K_I + K_T + K_B \qquad dB(A)$$

2 CRITERI DI VALUTAZIONE

2.1 I LIMITI ASSOLUTI DI ZONA

Il D.P.C.M. 1/3/91 e il successivo D.P.C.M. 14/11/97 prevedono la classificazione del territorio comunale in zone di sei classi:

Classe I - Aree particolarmente protette

Rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, ecc.

Classe II - Aree destinate ad uso prevalentemente residenziale

Rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali.

Classe III - Aree di tipo misto

Rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici.

Classe IV - Aree di intensa attività umana

Rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali; le aree con limitata presenza di piccole industrie.

Classe V - Aree prevalentemente industriali

Rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali con scarsità di abitazioni.

Classe VI - Aree esclusivamente industriali

Rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali prive di insediamenti abitativi.

Viene poi fissata una suddivisione dei livelli massimi in relazione al periodo di emissione del rumore, definito dal decreto come "Tempo di riferimento":

- *periodo diurno dalle ore 6.00 alle ore 22.00;*
- *periodo notturno dalle ore 22.00 alle ore 6.00.*

I limiti massimi di immissione prescritti nel D.P.C.M. 14/11/97, fissati per le varie aree, sono rappresentati nella tabella seguente

Classe di destinazione d'uso del territorio	*Periodo diurno (6-22)*	*Periodo notturno (22-6)*
Classe I - Aree particolarmente protette	*50 dBA*	*40 dBA*
Classe II - Aree destinate ad uso residenziale	*55 dBA*	*45 dBA*
Classe III - Aree di tipo misto	*60 dBA*	*50 dBA*
Classe IV - Aree di intensa attività umana	*65 dBA*	*55 dBA*
Classe V - Aree prevalentemente industriali	*70 dBA*	*60 dBA*
Classe VI - Aree esclusivamente industriali	*70 dBA*	*70 dBA*

Limiti massimi di immissione per le diverse aree (D.P.C.M. 14/11/97)

Mentre, per quel che riguarda i limiti di emissione (misurati in prossimità della sorgente sonora) abbiamo i seguenti limiti.

Classe di destinazione d'uso del territorio	*Periodo diurno (6-22)*	*Periodo notturno (22-6)*
Classe I - Aree particolarmente protette	*45 dBA*	*35 dBA*
Classe II - Aree destinate ad uso residenziale	*50 dBA*	*40 dBA*
Classe III - Aree di tipo misto	*55 dBA*	*45 dBA*
Classe IV - Aree di intensa attività umana	*60 dBA*	*50 dBA*
Classe V - Aree prevalentemente industriali	*65 dBA*	*55 dBA*
Classe VI - Aree esclusivamente industriali	*65 dBA*	*65 dBA*

Limiti massimi di emissione per le diverse aree (D.P.C.M. 14/11/97)

I livelli di pressione sonora, ponderati con la curva di pesatura A, devono essere mediati attraverso il Livello Equivalente (Leq).

In attesa della suddivisione del territorio comunale nelle zone di cui alla tabella precedente, si applicano per le sorgenti fisse i limiti di accettabilità (art. 6 D.P.C.M. 1/3/91) riportati nella tabella seguente.

Classe di destinazione d'uso del territorio	*Periodo diurno (6-22)*	*Periodo notturno (22-6)*
Tutto il territorio nazionale	*70 dBA*	*60 dBA*
Zona A (art. 2 D.M. n. 1444/68)	*65 dBA*	*55 dBA*
Zona B (art. 2 D.M. n. 1444/68)	*60 dBA*	*50 dBA*
Aree esclusivamente industriali	*70 dBA*	*70 dBA*

Limiti massimi per le diverse aree in attesa di zonizzazione (D.P.C.M. 1/3/91)

2.2 IL CRITERIO DIFFERENZIALE

2.2.1 Generalità

Questo tipo di criterio è un ulteriore parametro di valutazione che si applica alle zone non esclusivamente industriali che si basa sulla differenza di livello tra il "rumore ambientale" e il "rumore residuo".

Il "rumore ambientale" viene definito come il livello equivalente di pressione acustica ponderato con la curva A del rumore presente nell'ambiente con la sovrapposizione del rumore relativo all'emissione delle sorgenti disturbanti specifiche. Mentre con "rumore residuo" si intende il livello equivalente di pressione acustica ponderato con la curva A presente senza che siano in funzione le sorgenti disturbanti specifiche.

Il criterio differenziale non si applica nei seguenti casi, in quanto ogni effetto del rumore è da ritenersi trascurabile:

- se il rumore misurato a finestre aperte sia inferiore a 50 dBA durante il periodo diurno e 40 dBA durante il periodo notturno;
- se il livello del rumore ambientale misurato a finestre chiuse sia inferiore a 35 dBA durante il periodo diurno e 25 dBA durante il periodo notturno.

Non si dovrà tenere conto di eventi eccezionali in corrispondenza del luogo disturbato.

Le differenze ammesse tra il livello del "rumore ambientale" e quello del "rumore residuo" misurati nello stesso modo non devono superare i 5 dBA nel periodo diurno e 3 dBA nel periodo notturno.

La misura deve essere eseguita nel "tempo di osservazione" del fenomeno acustico.

Con il termine "tempo di osservazione" viene inteso il periodo, compreso entro uno dei tempi di riferimento (diurno, notturno), durante il quale l'operatore effettua il controllo e la verifica delle condizioni di rumorosità. Nella misura del "rumore ambientale" ci si dovrà basare su un tempo significativo ai fini della determinazione del livello equivalente e comunque la misura dovrà essere eseguita nel periodo di massimo disturbo.

Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo

Secondo l'articolo 2 del decreto 11.12.1996 "Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo", si intende per impianto a ciclo produttivo continuo:

- quello di cui non è possibile interrompere l'attività senza provocare danni all'impianto stesso, pericolo di incidenti o alterazioni del prodotto o per necessità di continuità finalizzata a garantire l'erogazione di un servizio pubblico essenziale;
- quello il cui esercizio è regolato da contratti collettivi nazionali di lavoro o da norme di legge, sulle ventiquattro ore per cicli settimanali, fatte salve le esigenze di manutenzione.

Inoltre si intende per impianto a ciclo produttivo continuo esistente quello in esercizio o autorizzato all'esercizio o per il quale sia stata presentata domanda di autorizzazione all'esercizio precedente all'entrata in vigore del decreto (15 giorni dopo la pubblicazione del decreto nella Gazzetta Ufficiale, avvenuta il 4 marzo 1997).

Secondo l'articolo 3 dello stesso decreto, gli impianti a ciclo produttivo continuo esistenti hanno l'obbligo del rispetto del criterio differenziale solo quando non siano rispettati i valori limite assoluti di zona. Se i valori limite assoluti di zona sono rispettati, questi impianti non devono rispettare il criterio differenziale; se invece i valori limite assoluti non sono rispettati, dovranno realizzare di un piano di risanamento acustico finalizzato anche al rispetto dei valori limite differenziali.

Circolare 6 settembre 2004 del Ministero dell'Ambiente.

"Interpretazione in materia di inquinamento acustico: criterio differenziale e applicabilità dei valori limite differenziali."

Al punto 6 di tale Circolare viene specificato che:

"Si precisa infine che nel caso di impianto esistente oggetto di modifica (ampliamento, adeguamento ambientale, etc.), non espressamente contemplato dall'art. 3 del decreto ministeriale 11 dicembre 1996, l'interpretazione corrente della norma si traduce nell'applicabilita' del criterio differenziale limitatamente ai nuovi impianti che costituiscono la modifica."

3 TEORIA DELL'INTENSITÀ SONORA.

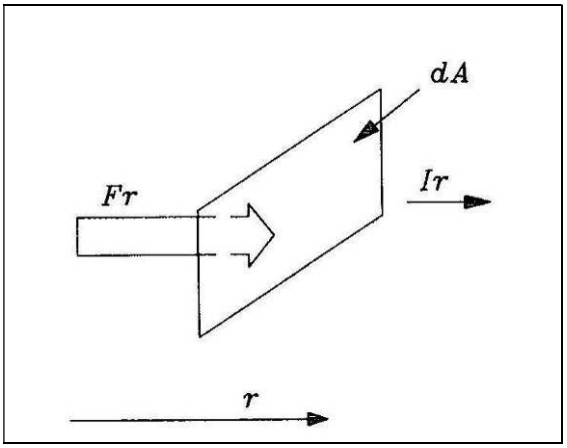
I primi studi sull'intensità sonora risalgono agli anni trenta (H.F.OLSON) ma è solo con l'avvento delle misure eseguite con tecniche di analisi in tempo reale che si sono potuti realizzare studi più approfonditi.

Il rilevamento di questa grandezza rende possibile la quantificazione dell'energia sonora emessa da una sorgente, e uno studio approfondito sulle caratteristiche di emissione della stessa.

L'intensità sonora (anche chiamata flusso di energia sonora), come abbiamo già visto precedentemente, è una grandezza vettoriale che descrive la quantità di flusso dell'energia sonora in una certa direzione.

Dal punto di vista fisico si differenzia notevolmente dalla pressione sonora (parametro a cui siamo certamente più abituati) perché quest'ultima è una grandezza scalare e non ci fornisce nessuna informazione di tipo direzionale.

Essendo un energia che attraversa una superficie in un certo tempo, come nella seguente figura,



Forza che agisce su una superficie

dimensionalmente l'intensità sonora verrà misurata in W/m^2.

Senza considerare una particolare direzione l'intensità sonora sarà data dalla relazione:

$$I = p \cdot u \qquad [W/m^2]$$

dove:

p = valore di pressione sonora;

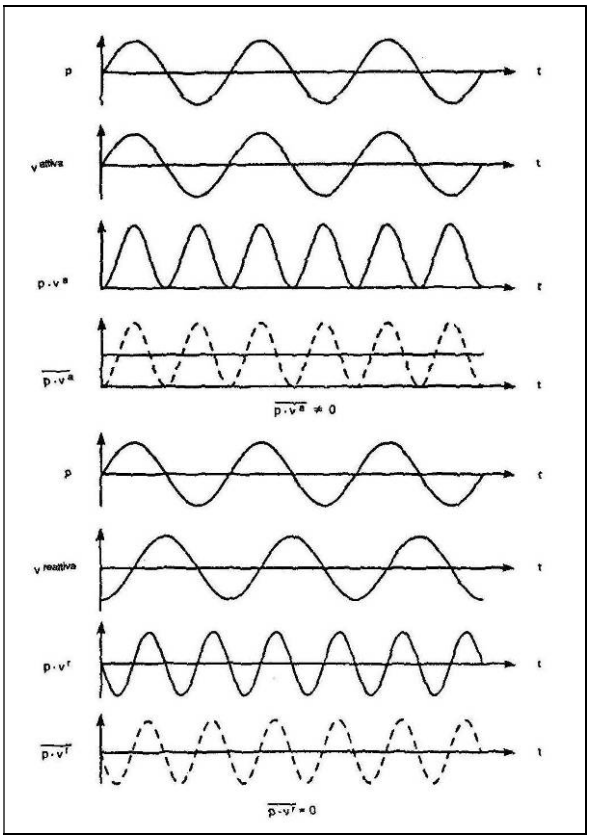
u = velocita' delle particelle.

Attenzione però, questo è vero solo nel caso in cui la velocità delle particelle non abbia delle componenti di tipo continuo (che non esista flusso d'aria).

Queste componenti possono essere evitate, entro certi limiti, attraverso l'uso di appositi schermi controvento.

Una delle particolarità dell'intensità sonora è la possibilità di distinguere la parte attiva del campo sonoro da quella reattiva: per parte attiva, si intende il campo sonoro creato da un onda in assenza di riflessioni (campo libero) e per parte reattiva il campo sonoro determinato dalle continue riflessioni dell'onda (campo riverberante).

Possiamo immaginare queste due componenti presenti nella velocità (u) delle particelle sfasate tra di loro di 90°; come nella figura seguente.



Andamenti dell'intensità sonora in relazione alla reattività del campo acustico

Si può notare come la parte reattiva, in quanto risultato del prodotto tra pressione e velocità eseguito come nella relazione precedente, dia un risultato nullo.

La possibilità di rilevare queste due componenti era fino ad oggi impossibile da realizzare con i normali mezzi di misura in uso, in particolare con i fonometri, perché la pressione sonora misurata è il contributo dei due campi (attivo e reattivo) e modificando la direzione di rilevamento del microfono i dati non cambiano, proprio perché la sua risposta spaziale deve essere omnidirezionale.

3.1.1 Rilievo dell'intensità sonora.

La direzionalità dei rilievi di intensità sonora viene sfruttata completamente in due principali applicazioni:

1) misura della potenza sonora;

2) ricerca dei punti di emissione di una sorgente.

Prima di entrare nel merito di queste applicazioni chiariamo come sia possibile sfruttare la teoria per realizzare un sistema di rilievo dell'intensità sonora.

Tornando, brevemente, alla relazione espressa dalla formula si può notare come per ottenere il valore di intensità sonora bisogna conoscere sia la pressione sonora che la velocità delle particelle, però mentre è molto semplice ottenere i valori di pressione con i mezzi usuali cioè con sistemi microfonici a condensatore, più complesso diventa il rilievo della seconda grandezza.

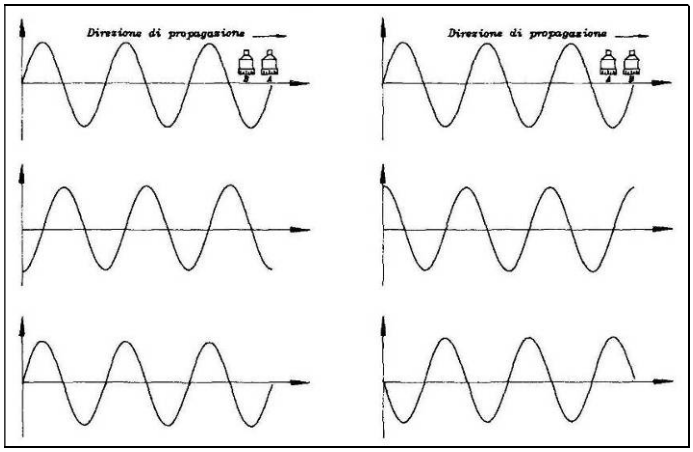
Uno dei metodi di indagine sulla velocità delle particelle è dato dall'uso di un anemometro a filo caldo con altissima sensibilità di risposta. Le difficoltà nell'applicare una simile metodica stanno nella limitata dinamica e soprattutto nella impossibilità di utilizzo per le normali misure ambientali, l'apparato è infatti sufficientemente delicato da limitarne l'uso quasi esclusivamente ad applicazioni di laboratorio.

Ricordando le considerazioni fatte dove si analizzavano i legami tra pressione sonora e velocità delle particelle potremo ricavare quest'ultima grandezza dalla prima attraverso un processo di integrazione dei valori di pressione presi in due punti abbastanza vicini.

Quanto è lecita un'approssimazione simile?

Sicuramente è valida se la separazione tra i due punti (Δr) è molto più piccola della lunghezza d'onda del suono analizzato.

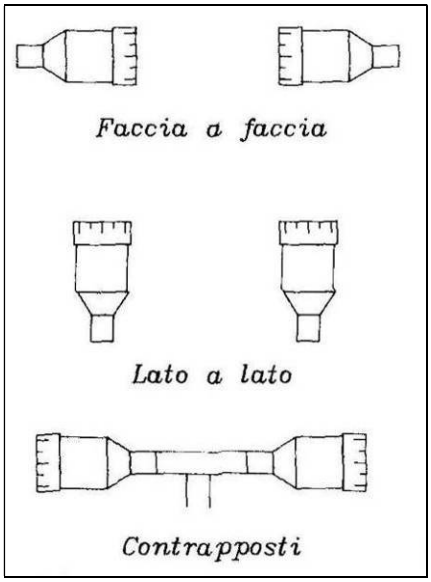
La misura della pressione nei due punti A e B viene svolta con due microfoni ravvicinati ed il segno (positivo o negativo) dell'intensità sonora viene determinato dalla reciproca posizione degli stessi, come riportato nella seguente figura.



Risposta dei microfoni accoppiati nel campo sonoro

Le indicazioni sul segno che otteniamo dal prodotto tra p e u dipenderanno anche dalla direzione dell'onda sonora, per cui nella direzione di provenienza noi otterremo sempre un massimo che sarà positivo se si prende come riferimento il microfono più vicino alla sorgente, mentre avremo un valore negativo se la sonda viene posizionata in senso contrario.

Le tecniche di posizionamento dei due microfoni sono di diverso tipo e fanno capo a diverse scuole; ognuno di essi posseggono vantaggi e svantaggi. Noi analizzeremo solo quella più diffusa e precisa che vede i due microfoni affacciati l'uno all'altro (face-to-face) come rappresentato nella figura sottostante.



Diversi tipi di posizionamento dei microfoni

La risposta direzionale della sonda così composta viene riportata nella seguente figura,

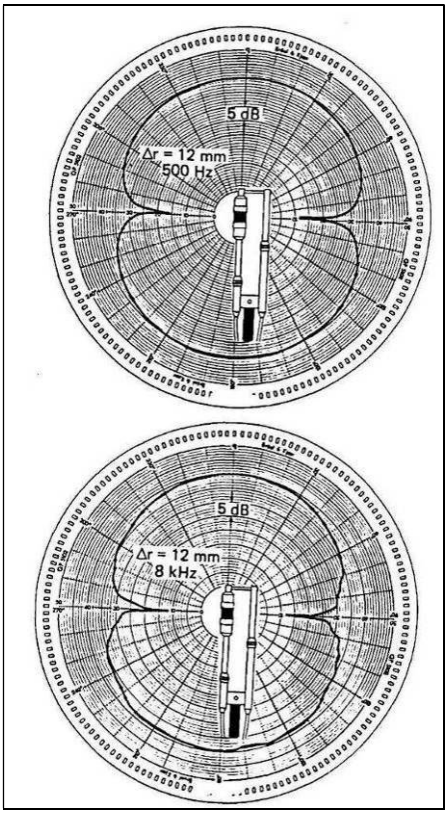
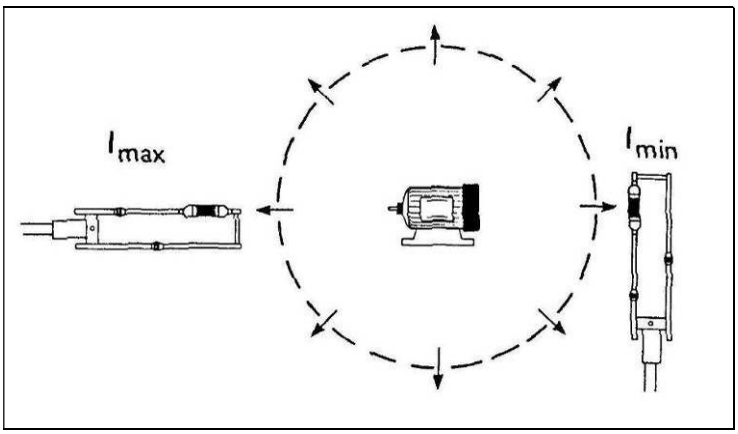


Diagramma polare della risposta della sonda intensimetrica

dove possiamo notare la principale caratteristica di omnidirezionalità. Nella direzione della freccia abbiamo un minimo di lettura per cui nel passaggio materiale della sonda sulla sorgente si avrà in successione una lettura del microfono A, il minimo di lettura, una lettura da parte del microfono B. Questo fa si che, quando la direzione di provenienza dell'onda è quella indicata dalla freccia in figura, il livello letto, dalla sonda, tende a essere molto piccolo.

Spostando questa sonda rispetto ad una sorgente fissa otterremo in un certo istante un brusco cambiamento di lettura strumentale, segno che la pressione rilevata prima dal microfono A e successivamente dal microfono B ora viene letto prima dal microfono B e poi da A.

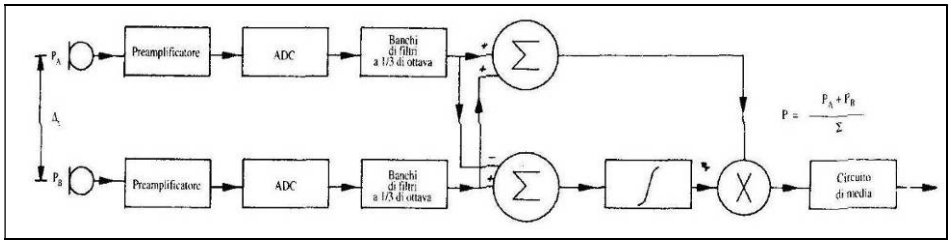
Il punto in cui avviene questo cambiamento di direzione ci indica una delle tre coordinate cartesiane spaziali necessarie per l'individuazione della sorgente come riportato nella seguente figura.



Direzionalità della sonda intensimetrica

Interpolando i dati così ottenuti si potranno costruire delle mappe di emissione sonora di cui più avanti vedremo alcuni esempi.

Il circuito elettronico che esegue questo calcolo è descritto nella figura seguente.



Schema a blocchi di un misuratore di intensità sonora

Si possono osservare i due distinti canali A e B che vengono da un lato sommati e dall'altro sottratti, infine dopo alcune operazioni i valori risultanti vengono moltiplicati ottenendo il valore dell'intensità sonora. Questo valore di intensità viene fornito filtrato in terzi di ottava o in ottave attraverso una serie di filtri digitali.

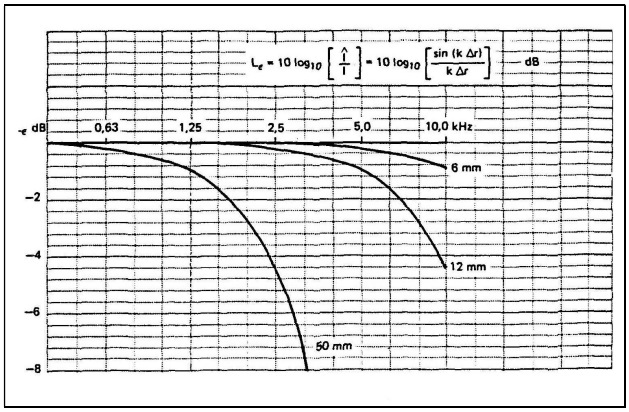
Questo è sicuramente un metodo molto diretto e non richiedendo molti passaggi, può essere considerato come un rilievo di intensità in tempo reale.

Esiste un altro metodo, per eseguire il rilievo dell'intensità sonora, che si basa sull'uso di un analizzatore in tempo reale a due canali con tecnica FFT (trasformata veloce di Fourier). In questo caso le frequenze vengono sintetizzate attraverso algoritmi matematici per cui viene rallentato notevolmente il calcolo dell'intensità sonora stessa.

3.1.2 Limitazioni nel rilievo dell'intensità sonora.

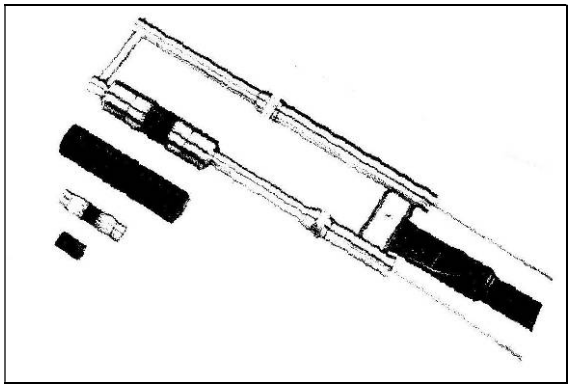
Si è già accennato alla prima grande limitazione della misura dell'intensità sonora: considerare un intervallo discreto Δr al posto di uno continuo. E' evidente infatti che le approssimazioni ottenute introducendo variazioni discrete al posto di una derivata continua nel calcolo della velocità particellare, sono valide solo se la lunghezza d'onda misurata è molto più grande del Δr che separa i microfoni.

I problemi iniziano quindi a sorgere per lunghezze d'onda piccole cioè in alta frequenza. Se possiamo esprimere l'errore di misura commesso in funzione delle frequenze per diverse distanze a cui vengono posti i microfoni otteniamo l'andamento descritto nel grafico seguente.

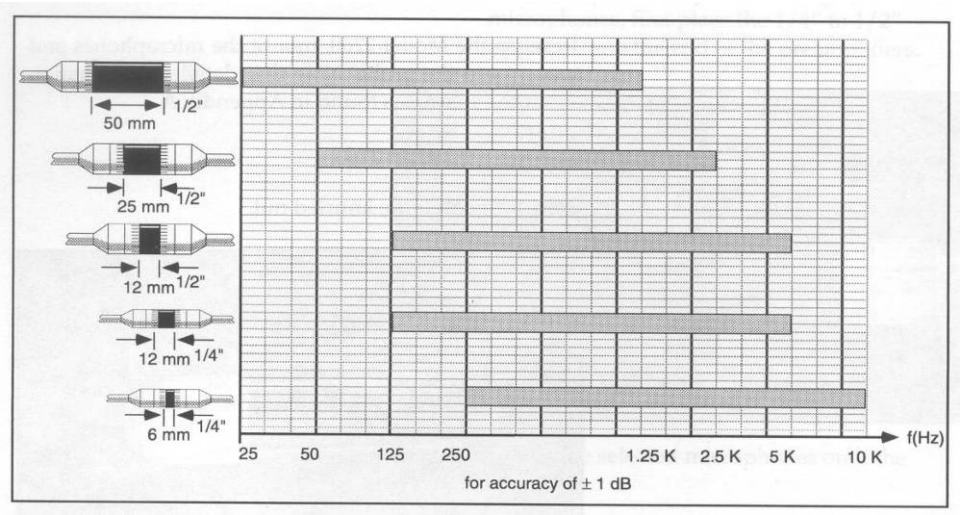


Limite alle alte frequenze in relazione allo spaziatore usato

Per poter misurare campi di frequenze diversi si possono quindi adottare diversi spaziatori e diversi tipi di microfoni come questi riportati nelle figure seguenti.



Sonda intensimetrica e spaziatori



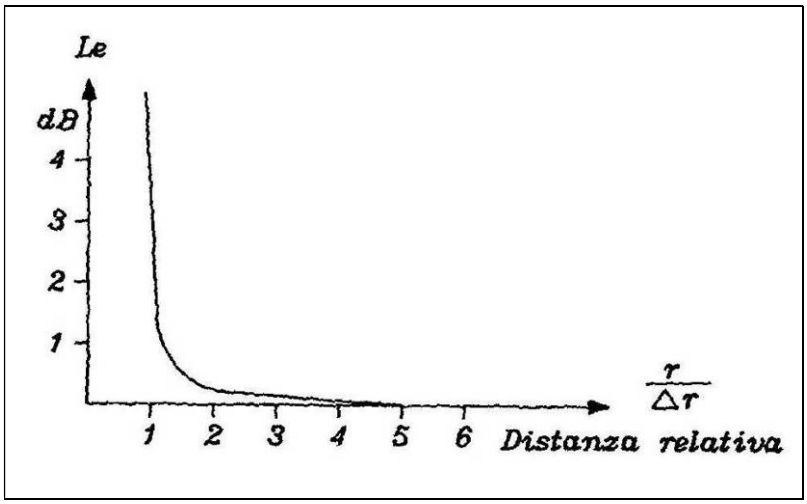
Campo di misura in frequenza in relazione alla diversa distanza tra i due microfoni

Come si può notare la possibilità di misurare frequenze alte viene notevolmente migliorata con l'adozione di microfoni da 1/4 di pollice e spaziatori molto piccoli.

Un secondo errore lo si può avere nella misura dell'intensità sonora in campo vicino.

In effetti, supponendo la sorgente puntiforme e con un tipo di irradiazione a monopolo, quando la misura viene eseguita a distanze paragonabili a quelle dello spaziatore tra i due microfoni si può incorrere in grossolani errori.

Rappresentando l'errore commesso in funzione del rapporto $r/\Delta r$ otteniamo il seguente grafico.



Errore dovuto alla distanza relativa

La distanza minima di misura, per non commettere errori, si differenzia a seconda del tipo di emissione sonora e aumenta con l'allontanarsi dalle condizioni di sorgente monopolo, come si può notare nella tabella seguente.

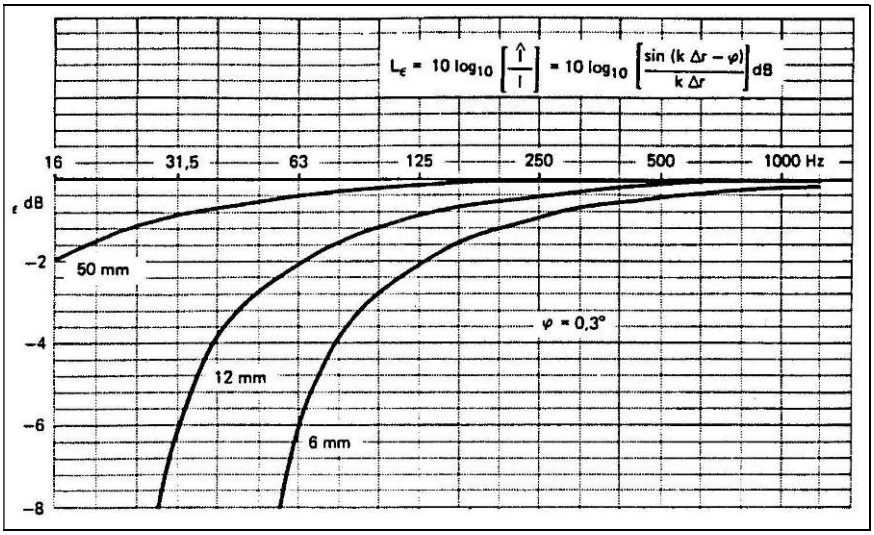
Tipo di sorgente	Errore di prossimità minore di 1 (dB)
Monopolo	> 1.1 r
Dipolo	> 1.6 r
Quadripolo	> 2.3 r

Errore in decibel legato al tipo di irradiazione della sorgente

Uno dei problemi fondamentali nel rilievo dell'intensità sonora, rimane comunque la, sempre presente, differenza di fase tra i due canali alle diverse frequenze. Questa differenza si può avere

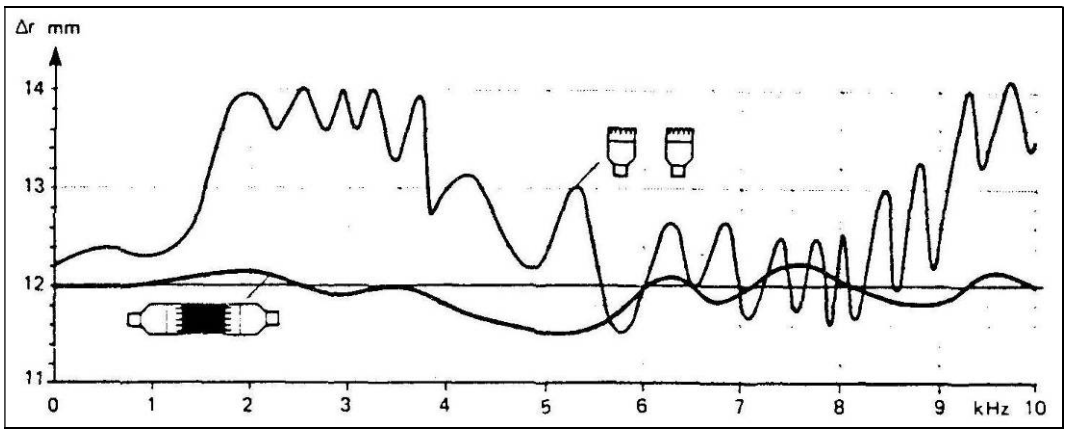
sia sulla parte elettronica, che comunque è sempre più controllabile, sia sulle caratteristiche dei microfoni che possono solo essere selezionati ed accoppiati.

Il limite di misura in questo caso viene imposto sulle basse frequenze ed è più critico con microfoni ravvicinati piuttosto che nella configurazione faccia-a-faccia, come possiamo notare nel grafico seguente.



Limite alle basse frequenze in relazione allo spaziatore usato

Una differenza di fase dei due microfoni provoca inoltre uno spostamento del centro acustico degli stessi per cui la distanza r, sarà anch'essa funzione della frequenza. Come si può osservare nella seguente figura,

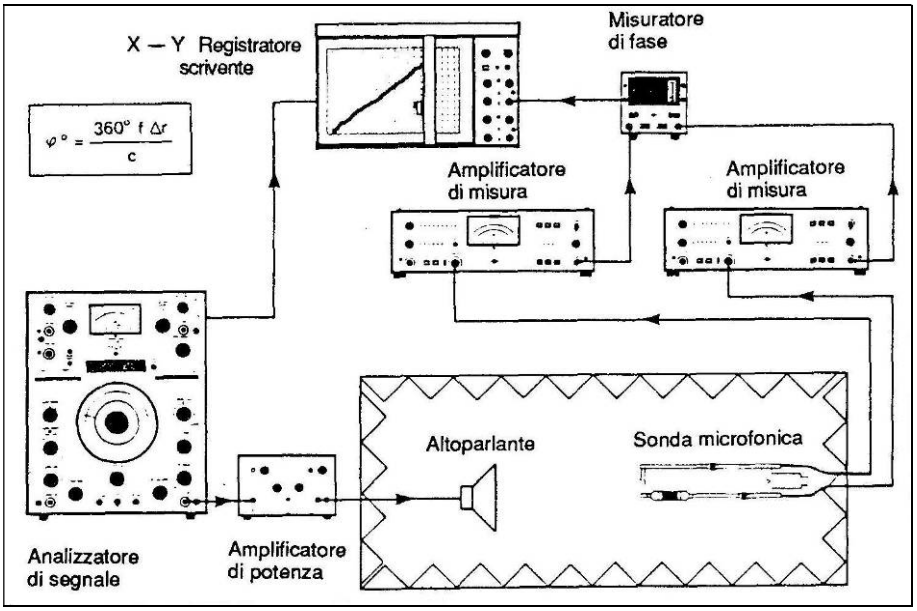


Errore di fase tra i due sistemi di posizionamento dei microfoni

vengono mostrate le risposte di due tipi di sistemi di sonda utilizzabili, cioè microfoni messi faccia a faccia e microfoni avvicinati di lato.

La scelta dei microfoni dovrà tener conto di tutti questi fattori, rendendo necessaria una accurata selezione ed una precisa taratura di tutta la catena.

Un sistema di calibrazione per rilevare la separazione del centro acustico dei microfoni è quello rappresentato nella seguente figura



Sistema di calibrazione della sonda intensimetrica

in cui si ha da un lato la parte di generazione (scansione sinusoidale di frequenza) e dall'altro la parte di analisi formata da due amplificatori di misura le cui uscite vengono ben analizzate da un misuratore di fase e successivamente il risultato viene riportato in forma grafica su un registratore X-Y.

3.1.3 Applicazioni dell'intensità sonora.

L'applicazione più importante è data sicuramente dalla possibilità di ricavare direttamente la potenza sonora emessa da una sorgente particolare.

La potenza sonora emessa da una sorgente ha un valore uguale all'integrale del prodotto scalare del vettore di intensità sonora per il vettore della superficie elementare associata, individuata su una qualunque superficie che circonda completamente la sorgente.

Ricordiamo la relazione esistente tra intensità sonora e potenza

$$W = \int_S I\, da = \int_S I_n\, da \qquad \text{[W]}$$

dove:

I_n è il valore dell'intensità sonora nella direzione perpendicolare alla superficie di misura.

Eseguendo una media dei valori rilevati su questa superficie con tempi di integrazione sufficientemente lunghi, si potrà ricavare direttamente il valore della potenza sonora con il solo prodotto del valore di intensità mediata spazialmente per quello della superficie di inviluppo.

Tutto questo senza ricorrere a misure in ambienti qualificati.

L'utilizzo dei valori di potenza rilevati con queste metodiche non è ancora previsto dalle vigenti raccomandazioni anche se la precisione diventa comparabile con i risultati ottenuti con i procedimenti di misura descritti nelle norme specifiche.

Le norme internazionali precedenti che descrivono i metodi per la determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore, principalmente la serie dalla ISO 3740 alla ISO 3747, indicano senza eccezione il livello di pressione sonora come la grandezza acustica primaria da misurare. La relazione tra il livello di intensità sonora e il livello di pressione sonora in qualunque punto dipende dalle caratteristiche della sorgente, dalle caratteristiche dell'ambiente di misurazione e dalla disposizione delle posizioni di misurazione rispetto alla sorgente. Perciò le norme dalla ISO 3740 alla ISO 3747 specificano necessariamente le caratteristiche della sorgente, le caratteristiche dell'ambiente di prova e le procedure di definizione, oltre ai metodi di misurazione che permettono di ridurre, entro limiti accettabili, l'incertezza della determinazione del livello di potenza sonora.

Le procedure specificate dalla ISO 3740 alla ISO 3747 non sono sempre applicabili, per le ragioni seguenti:

a) Se è richiesto un alto grado di precisione sono necessari costosi apparati di prova: sovente non è possibile installare e mettere in funzione apparecchiature di grandi dimensioni in tali installazioni.

b) Questi non possono essere utilizzati in presenza di livelli elevati di rumore residuo generato da sorgenti diverse da quelle allo studio.

Lo scopo della ISO 9614 è quello di specificare dei metodi grazie ai quali possano essere determinati i livelli di potenza sonora di sorgenti, entro limiti specifici di incertezza e in condizioni di prova che siano meno restrittive di quelle richieste dalla serie dalla ISO 3740 a ISO 3747. La potenza sonora è quella determinata in sito mediante il procedimento descritto nella prima parte della ISO 9614; è fisicamente una funzione dell'ambiente e, in alcuni casi, può essere differente dalla potenza sonora della stessa sorgente, determinata in altre condizioni.

La ISO 9614 completa la serie dalla ISO 3740 alla ISO 3747 che specificano diversi metodi per la determinazione dei livelli di potenza sonora di macchine ed apparecchiature. Si differenzia da queste norme internazionali soprattutto in tre aspetti:

- ✓ Vengono eseguite le misurazioni di intensità sonora e, contemporaneamente, di pressione sonora;
- ✓ L'incertezza del livello di potenza sonora determinato con il metodo specificato nella ISO 9614 è classificata in base ai risultati di prove ausiliarie specificate e di calcoli eseguiti congiuntamente alle misurazioni di prova;
- ✓ I limiti attuali della strumentazione per misure intensimetriche restringono le misurazioni alle bande di terzo di ottava comprese tra 50 Hz e 6,3 kHz. I valori ponderati A entro un numero limitato di bande sono determinati a partire dai valori componenti per bande di ottava e di terzo di ottava e non da misurazioni dirette ponderate A.

La ISO 9614 fornisce un metodo per la determinazione del livello di potenza sonora di una sorgente di rumore fissa a partire da misurazioni dell'intensità sonora su una superficie che circonda la sorgente. In teoria, l'integrale, su qualunque superficie che circonda completamente la sorgente, del prodotto scalare del vettore di Intensità sonora per il vettore della superficie elementare associata, fornisce la misura della potenza sonora emessa direttamente nell'aria da tutte le sorgenti comprese nella superficie circostante ed esclude il suono emesso dalle sorgentl poste al di fuori di questa superficie. In presenza di sorgenti sonore che operano al di fuori della superficie di misurazione, qualunque sistema che si trovi compreso all'interno della superficie può assorbire una frazione dell'energia che riceve. La potenza sonora totale assorbita all'interno della superficie di misurazione appare come contributo negativo alla potenza della sorgente e può provocare un errore durante la determinazione della potenza sonora; per poter ridurre l'errore

associato alla misurazione, è perciò necessario eliminare eventuali materiali fonoassorbenti che si trovino all'interno della superficie di misurazione e che non siano normalmente presenti durante il funzionamento della sorgente in prova.

La prima parte della ISO 9614 si basa sul campionamento in punti discreti del campo di intensità sonora normale alla superficie di misurazione. L'errore di campionamento risultante è una funzione della variazione spaziale della componente di intensità normale sulla superficie di misurazione, che dipende dalla direttività della sorgente, dalla superficie di campionamento scelta, dalla distribuzione dei punti di campionamento e dalla vicinanza di sorgenti estranei al di fuori della superficie di misurazione.

La precisione di misurazione della componente normale dell'intensità sonora in un punto dipende dalla differenza tra il livello di pressione sonora locale e il livello di intensità sonora normale locale. Può verificarsi una grande differenza quando il vettore intensità nella posizione di misurazione forma un ampio angolo (prossimo a 90°) con la perpendicolare locale alla superficie di misurazione. In altri casi, il livello di pressione sonora locale può includere notevoli contributi provenienti da sorgenti situate all'esterno della superficie di misurazione, ma può essere associato ad un debole flusso netto di energia sonora, come nel caso di un campo riverberante in uno spazio chiuso; oppure il campo può essere notevolmente reattivo a causa della presenza di un campo vicino e/o in presenza di onde stazionarie.

Nel caso di misure di intensità sonora diretta i vantaggi sono molteplici, facciamo ora un breve riepilogo:

- *a)* Non esistono restrizioni sul tipo di campo sonoro che si utilizza per cui ci si può porre sia in campo vicino (con le raccomandazioni del caso) che in campo lontano facendo però variare il numero di punti di misura. Infatti per le misure in campo vicino l'elemento importante da prendere in considerazione è la direzionalità di emissione delle sorgenti; per avere un dato attendibile bisogna aumentare il numero dei punti di rilievo.

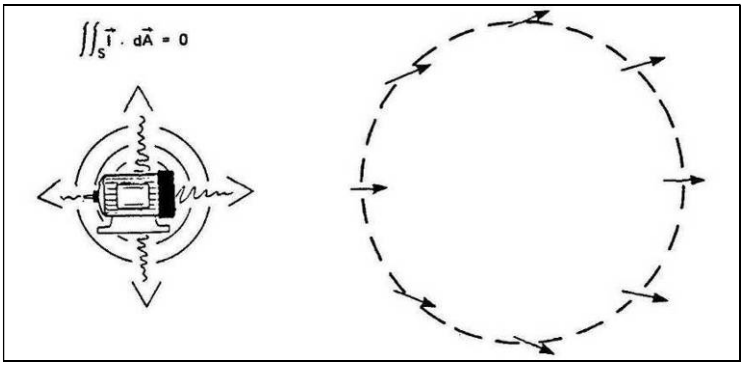
- *b)* Non viene richiesto nessun ambiente particolare per cui le misure di potenza possono essere eseguite in qualunque ambiente.

- *c)* La misura può anche essere eseguita in presenza di rumore esterno alla sorgente a patto che questo sia di carattere continuo.

- *d)* L'area su cui viene eseguita la media può avere qualunque forma. Questo diventa importante con sorgenti di grandi dimensioni e di forma strana.

- *e)* E' possibile analizzare sorgenti costituite da parti congiunte, sia come misura totale di emissione sia come misura parziale della singola struttura.

Se la sorgente è esterna alla superficie di misura, nel processo di integrazione il contributo di intensità da un lato della superficie sarà uguale e contrario a quello rilevato dal lato opposto per cui i due contributi si annullano e il risultato pertanto sarà pari a zero (questo se nella superficie di misura non esistono altre sorgenti, come nella seguente figura.



Applicazione del teorema di Gauss all'intensità sonora

Il dato di intensità sonora rilevata dall'integrazione sulla superficie sarà solo quello emesso internamente alla superficie stessa senza che questa sia influenzata da emissioni esterne.

Questo, diventa molto importante nella determinazione della potenza emessa da un singolo elemento di una struttura complessa dal punto di vista acustico.

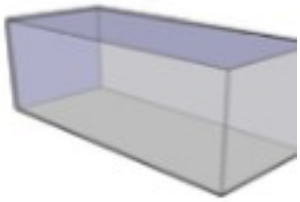
3.1.4 Le misure eseguite sulle sorgenti

Nell'allegato specifico riportiamo tutti i dati relativi alla misura delle diverse sorgenti. Questi sono posti sotto forma di report, come mostrato nella figura sottostante. Sono state valutate anche le emissioni derivanti dalle barre che in presenza di umidità dell'aria generano rumore per il cosiddetto "effetto corona", anche se non è stato realizzare un vero e proprio report di misura.

Posizionamento: sorgente in normale funzionamento al centro della superficie di invilu
Sorgente misurata: Frantumatore
Superficie di inviluppo: 28 m²
Incertezza associata (KwA): 1.4 dBA
Indicatore di campo $L_d > F_{pl}$ SI
Indicatore di campo $F_{+/-} <= 3$ dB SI
Strumentazione utilizzata: SINUS - Apollo 4 ch

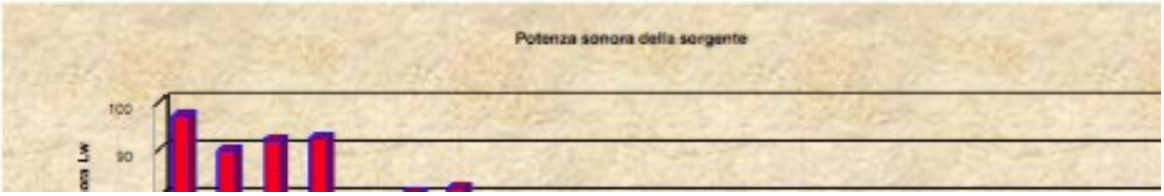
Freq (Hz)	L_p (dB)	L_i (dB)	L_w (dB)
50	90.1	82.7	97.2
63	82.6	75.4	89.9
80	84.1	77.6	92.1
100	84.7	78.1	92.6
125	81.5	61.9	76.4
160	79.7	66.3	80.8
200	79.7	67.6	82.1
250	78.5	61.8	76.3
315	76.6	60.5	75.0
400	73.4	49.0	63.5
500	70.1	57.8	72.3
630	70.1	58.9	73.4
800	68.0	56.4	70.9
1000	67.8	58.8	73.3
1250	67.4	59.8	74.3
1600	65.7	55.2	69.7
2000	64.8	55.5	70.0
2500	65.0	55.2	69.7
3150	65.2	49.1	63.6
4000	65.4	55.1	69.6
5000	65.8	56.3	70.8
63000	66.3	61.6	76.1
8000	65.6	60.6	75.1
Lin	93.6		100.1
A	80.4		84.6

Tipologia superficie di invilupp



Dimensioni superficie di inviluppo

Lunghezza (m)
Larghezza (m)
Altezza (m)
Superficie di inviluppo (m²)



Esempio di report di una sorgente misurata

4 MODELLISTICA MATEMATICA SUL RUMORE

Diamo una breve descrizione del modello matematico utilizzato ai fini delle previsioni di impatto acustico in esame.

4.1 GRANDEZZE CONSIDERATE AI FINI DELL'ATTENUAZIONE ACUSTICA

- Direttività della sorgente

Molto spesso nelle emissioni di rumore che avvengono a media ed alta frequenza osserviamo una certa direttività nell'emissione sonora della sorgente.

Dovremo quindi tenere conto di questa eventualità e considerare come livello di potenza sonora non tanto quello globale fornito ma un livello corretto che tenga conto di questa direttività

$$L_{wd} = L_w + D_c \qquad [1]$$

dove:

L_{wd} è il livello di potenza sonora corretto (dB);

L_w è il livello di potenza sonora medio (dB);

D_C è la correzione da applicare al livello di potenza sonora (dB).

La condizione in cui il fattore correttivo D_C=0 dB indica che la sorgente è omnidirezionale o che comunque non possiede una spiccata direttività.

I termini che compongono D_C sono fondamentalmente due: l'indice di direttività *(directivity index* D_i) e l'indice di emissione sull'angolo solido (D).

$$D_c = D_i + D_\Omega \qquad [2]$$

Il fattore di correzione D sarà:

D = 0 dB emissione su 4 radianti (radiazione sferica sull'intero spazio);

D = 3 dB emissione su 2 radianti (una superficie riflettente);

D = 6 dB emissione su radianti (due superfici riflettenti);

D = 9 dB emissione su radianti (tre superfici riflettenti).

Questi fattori correttivi vanno bene seguendo il metodo di calcolo proposto in queste pagine, in quando l'influenza dell'assorbimento del terreno viene tenuta in conto nei prossimi paragrafi. Nel caso di metodi diversi in cui l'attenuazione del terreno non viene contemplata i valori saranno i seguenti:

D = 0 dB emissione su 4 radianti (radiazione sferica sull'intero spazio);

D = 3 dB emissione su 2 radianti (una superficie riflettente che non sia il terreno);

D = 3 dB emissione su radianti (due superfici riflettenti di cui una il terreno);

D = 6 dB emissione su radianti (due superfici riflettenti di cui nessuna sia il terreno);

D = 6 dB emissione su radianti (tre superfici riflettenti di cui una il terreno);

D = 9 dB emissione su radianti (tre superfici riflettenti).

Elementi di attenuazione sul percorso dell'onda acustica

Il livello di pressione sonora L_p presente nella posizione del ricevitore sarà fornita dal valore di partenza della potenza sonora a cui devono essere detratti i contributi di attenuazione.

$$L_p = L_{wd} - A \qquad [3]$$

dove:

L_p è il livello di pressione sonora al ricevitore(dB);

L_{wd} è il livello di potenza sonora corretto (dB);

A è la correzione da applicare che tiene conto dei fattori di attenuazione (dB).

I fattori di assorbimento che concorrono nella formazione del nostro termine A possono essere riassunti nella seguente relazione:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{ter} + A_{rifl} + A_{dif} + A_{misc} \qquad [4]$$

dove:

A_{div} è l'attenuazione per la divergenza geometrica (dB);

A_{atm} è l'attenuazione per le condizioni meteorologiche (dB);

A_{ter} è l'attenuazione del terreno (dB);

A_{rifl} è l'attenuazione per la riflessione su ostacoli (dB);

A_{dif} è l'attenuazione per effetti schermanti (dB);

A_{misc} è l'attenuazione per effetti diversi (dB).

Le condizioni del vento non entrano in questo contesto supponendole di entità non influente, per aree ad intensa presenza di vento si correggerà la direzionalità di emissione della sorgente.

4.2 SPECIFICHE DEL MODELLO MATEMATICO USATO

Il modello matematico per acustica usato è Soundplan ver. 6.4 prodotto dalla Braunstein + Bernt Gmb.

E' il modello acustico più diffuso e testato nel mondo e consente attraverso i suoi moduli di poter sopperire a tutte le problematiche di emissione delle diverse sorgenti presenti sul territorio.

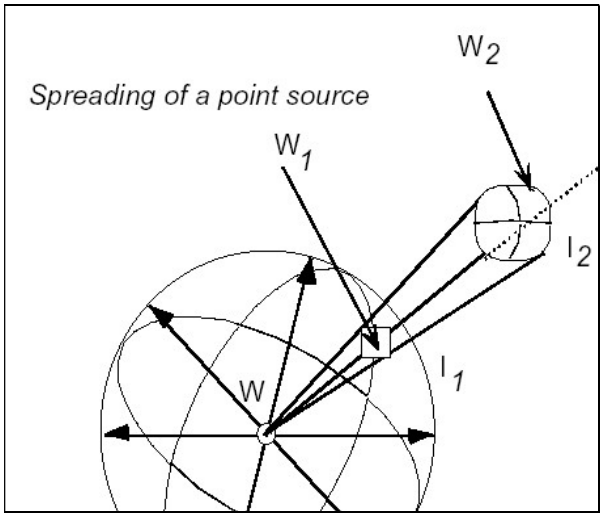
Il problema di un qualunque modello matematico è che questi sono nati per sparare fuori numeri e se non c'è un operatore in grado di capire se l'output sono cose sensate o meno il risultato può essere disastroso. Non a caso abbiamo sviluppato un capitolo dedicato alle incertezze associate alle valutazioni.

4.2.1 Tecnica di ritracciamento dei raggi (*Raytracing*)

Nel calcolo del livello presente nei diversi punti della rappresentazione spaziale della zona è stata utilizzata la tecnica di ritracciamento.

Vengono in sostanza sparati dei raggi che partono dalle diverse sorgenti e quando un raggio colpisce un ostacolo il punto di proiezione diventa esso stesso una sorgente di tipo puntiforme.

La situazione viene descritta nella figura seguente.



Emissione dei raggi di tracciamento

Viene infine calcolato il contributo dei diversi raggi che arrivano all'ascoltatore ipotetico come somma energetica dei livelli.

4.2.2 Le tipologie di sorgenti

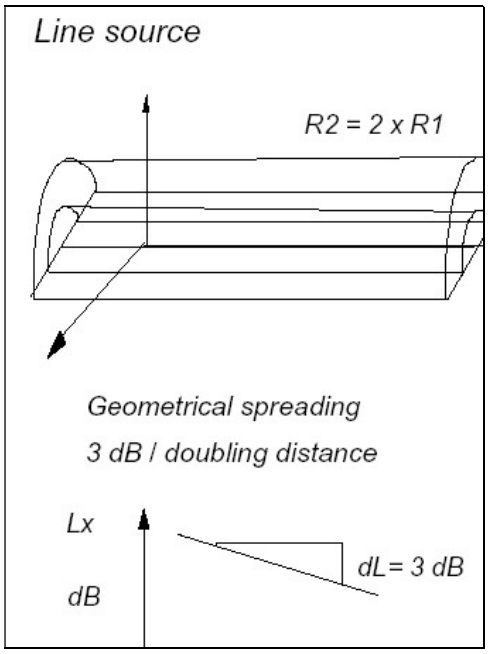
Come sappiamo le sorgenti possono essere considerate fondamentalmente di tre tipi:

- ✓ puntiformi
- ✓ lineiformi
- ✓ areali

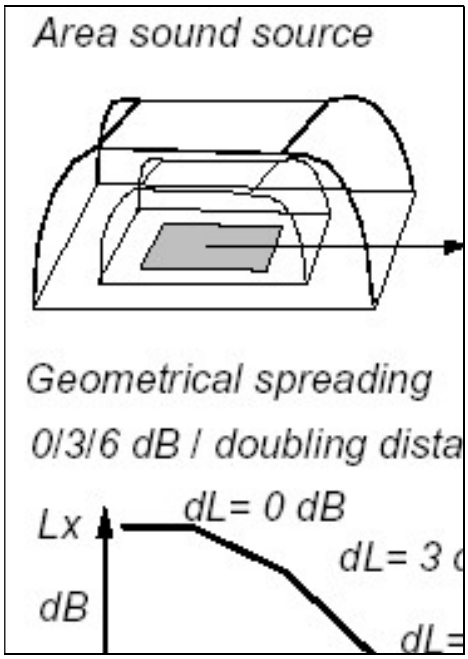
Per le sorgenti puntiformi vale la legge generale della divergenza geometrica per cui abbiamo che ad ogni raddoppio della distanza un'attenuazione di 6 dB del livello sonoro.

Nel caso di sorgente lineare, come in pratica sono rappresentate tutte le sorgenti viarie abbiamo una situazione che viene descritta nella figura seguente.

Per le sorgenti areali la propagazione è una composizione delle diverse tipologie e diviene molto importante nella valutazione di impianti e strutture industriali.



Emissione di una sorgente lineiforme

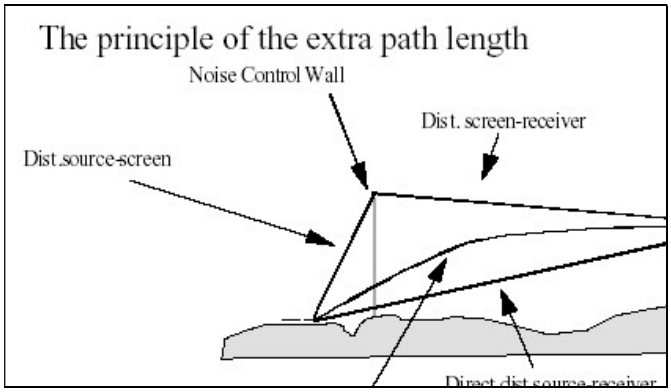


Emissione di una sorgente areale

4.2.3 La diffrazione degli ostacoli

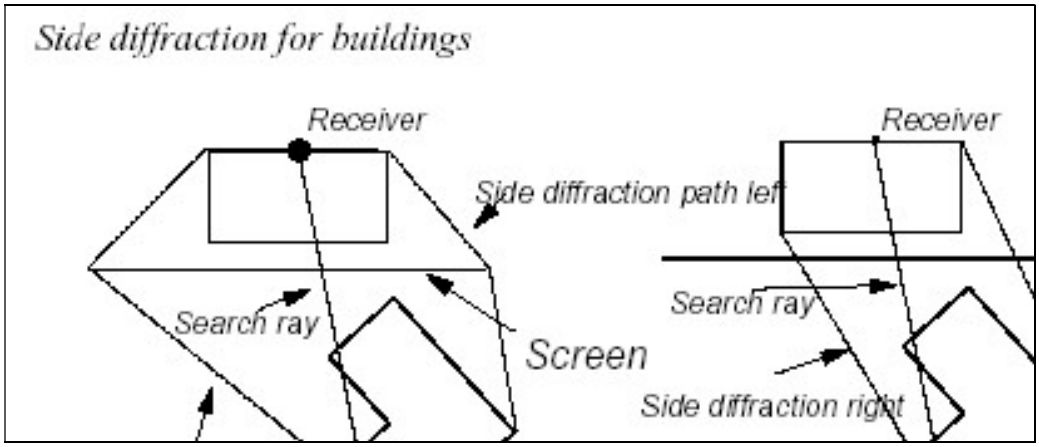
Elemento importante soprattutto per la caratterizzazione degli eventuali risanamenti sono le metodologie di calcolo per le barriere e gli eventuali ostacoli.

Nella figura sottostante si possono notare i diversi percorsi dell'onda acustica nel suo cammino quando incontra una barriera.



Diffrazioni verticali

All'interno del programma di calcolo vengono considerate non solo le diffrazioni dei bordi superiori di eventuali ostacoli (barriere, edifici, ecc.) ma anche le diffrazioni laterali, cosa molto importante nel caso di strutture industriali.

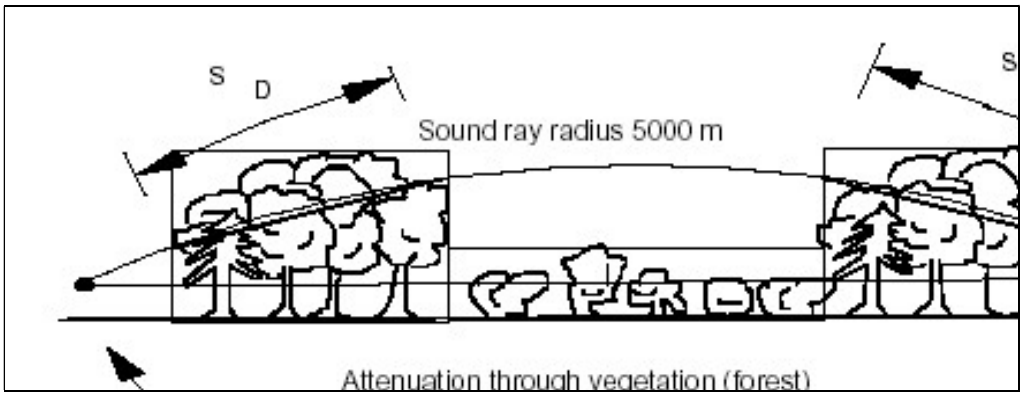


Diffrazioni laterali

4.2.4 L'assorbimento di elementi

Lungo il suo percorso l'onda sonora può incontrare elementi che assorbono parte dell'energia come può avvenire nel caso di boschi o di aree particolari con moltitudine di ostacoli.

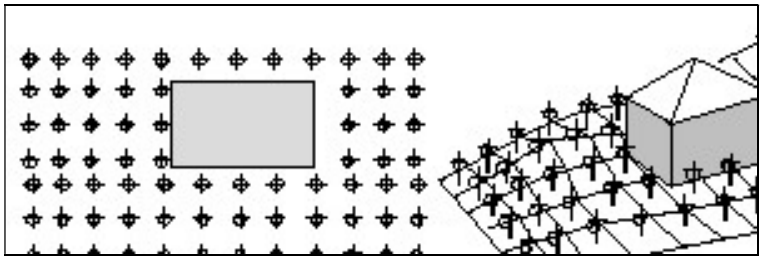
Nel programma è possibile considerare queste aree fornendo un valore di assorbimento per frequenza o semplicemente impostando la tipologia del fogliame.



Calcolo di una mappa ad una certa quota dal terreno

4.2.5 Quote di calcolo delle mappe

Le mappature sono ottenute ad una certa altezza relativa dal terreno in modo che anche in condizioni di morfologie particolari i livelli sono quelli che si misurerebbero andando su quel punto con un cavalletto di altezza pari alla quota scelta.



Calcolo di una mappa ad una certa quota dal terreno

4.3 RIFERIMENTI NORMATIVI DEL MODELLO UTILIZZATO

Per quanto riguarda l'accuratezza del modello utilizzato va precisato che questo è stato verificato in molte condizioni reali anche nel nostro paese, e gli algoritmi di calcolo sono conformi alle seguenti linee guida e normative Europee:

- ISO 9613-1 "Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Method of calculation of the attenuation of sound by atmospheric absorption"
- ISO 9613-2 "Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: A general method of calculation"
- VDI 2714 "Sound propagation outdoors"
- VDI 2720 "Noise control by screening"
- RLS90 "Guideline for noise protection along highways"
- SHALL 03 "Guideline for calculating sound immission of railroads"
- VDI 2751 "Sound radiation of industrial buildings"

5 ACCURATEZZA DELLE MISURE E DELLE SIMULAZIONI

5.1 ACCURATEZZA DELLE MISURE ACUSTICHE

I problemi relativi all'accuratezza della misura sono diversi ed in particolare dobbiamo tenere in considerazione:

- incertezza dello strumento;
- incertezza del sistema microfonico per esterni;
- variabilità dell'emissione della sorgente;
- condizioni atmosferiche;
- direttività dell'onda sonora incidente;
- campo sonoro nel punto di misura.

5.1.1 Incertezza dello strumento

Evitando di scavare troppo nelle problematiche metrologiche degli strumenti per il rilevamento del rumore, diciamo che la sola parte di analisi del segnale (il corpo dello strumento con il suo sistema di alimentazione senza microfono) una volta che è stato verificato presso un centro SIT ha un notevole livello di accuratezza che potremmo riassumere entro i 0,3 dB(A).

5.1.2 Incertezza della parte microfonica

Questa parte è sicuramente quella che della catena strumentale può avere più problemi. Infatti dobbiamo pensare che il microfono ed in particolare la membrana è sottoposta a escursioni termiche notevoli e non sempre il funzionamento continua a essere lineare. Anche l'umidità incide pesantemente sulla risposta del microfono in quanto questo è fondamentalmente un condensatore che ha come dielettrico l'aria e quando questa è umida variano le condizioni di movimento della membrana e della conducibilità dielettrica.

Dalle osservazioni svolte in molti anni di misure e in molteplici verifiche su sistemi di monitoraggio per esterni, la variabilità di risposta dei microfoni per esterni può essere contenuta entro 1 dB(A).

5.1.3 Variabilità delle condizioni emissive della sorgente

Se non avvengono fatti strani, come ad esempio per un'infrastruttura può essere un incidente stradale (anche se questi sono all'ordine del giorno), la ripetibilità emissiva di un insieme di sorgenti

sul territorio è notevole e da giorno a giorno (almeno per i feriali) abbiamo valori medi globali che si discostano entro 1 dB(A).

La maggior variabilità del rumore emesso la si ha nel periodo notturno, dove i flussi di traffico sono di molto inferiori a quelli diurni e le velocità salgono.

5.1.4 Variabilità delle condizioni atmosferiche

Per il fatto stesso che le misure vengono eseguite all'aperto, questi elementi sono più importanti di quanto sembri. Una variazione della velocità dell'aria, anche modesta, può comportare una variazione di livello di alcuni dB(A), per cui è bene che le misure avvengano in condizioni pressoché stabili.

In condizioni di controllo dei parametri dove si hanno temperature comprese tra i 5 e i 35 °C, velocità dell'aria inferiore a 1 m/s e umidità compresa tra il 30 e il 90% con un normale sistema per esterni possiamo stare sotto un'incertezza di 0,5 dB(A).

5.1.5 Direttività dell'onda acustica incidente

Questa componente non è di grande rilevanza quando parliamo di rumore proveniente da infrastrutture viarie (che costituiscono, statisticamente, un contributo pari al 90% del clima acustico del territorio) in quanto le frequenze in gioco vanno dai 100 ai 1000 Hz.

5.1.6 Campo sonoro nel punto di misura

Questo elemento può avere una certa importanza se nelle vicinanze del punto di misura vi sono superfici riflettenti.

Sicuramente i valori rilevati ad una stessa distanza dal bordo dell'infrastruttura ma in due contesti di campo sonoro diversi possono portare a differenze di alcuni dB(A).

L'importante è che se questa misura è finalizzata alla taratura del modello matematico, ne si tenga conto in fase di simulazione.

5.1.7 Calcolo delle incertezze associate alle misure

Tenuto conto delle grandezze che intervengono nella determinazione del misurando, l'incertezza associata alle misure acustiche può essere espressa attraverso la relazione seguente

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^{n} u_i^2(y)$$

La quantità $u_i(y)$ (i = 1, 2, .., N) è il contributo all'incertezza standard associata al valore stimato y di *output* risultante dall'incertezza standard associata x_i

$$u_i(y) = c_i u(x_i)$$

dove c_i è il coefficiente di sensibilità associato al valore stimato di *input* x_i, ad esempio la derivata parziale della funzione modello f rispetto ad X_i, valutata al valore stimato di *input* x_i,

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big| X_i = x_1 \ldots X_N = x_N$$

Il coefficiente di sensibilità c_i descrive l'estensione con la quale il valore dei dati di uscita y è influenzato dalle variazioni del valore stimato di *input* x_i.

Nel nostro caso, con le ampiezze di incertezza espresse nei punti precedenti, in condizioni meteo normali abbiamo un'incertezza totale sulla misura acustica pari a

$$u(m) = 1.64 \text{ dBA}$$

5.2 ACCURATEZZA DELLE SIMULAZIONI ACUSTICHE

Gli elementi che concorrono all'incertezza dei dati forniti da una valutazione previsionale possono essere fondamentalmente riassunti nei seguenti punti:

- tipo di modello e utilizzatore di questo;
- dati delle potenze delle sorgenti in gioco;
- dati non considerati nella propagazione sonora;
- corretto inserimento della morfologia del territorio;
- riferimenti normativi del modello;
- taratura del modello;
- scelta dei parametri di calcolo.

5.2.1 Tipo di modello e utilizzo dello stesso

Vi sono in commercio diversi modelli matematici dedicati all'acustica con costi e prestazioni svariate. Non spetta a me dire quale è quello buono e quello non buono per lo specifico uso, di certo ve ne sono alcuni che sono molto approssimativi su queste problematiche e che, quantomeno, non danno modo di percepire un possibile errore valutativo.

In questo senso conta molto l'esperienza del modellista che oltre che tecnico competente ai sensi di legge deve avere anche una conoscenza profonda delle problematiche di propagazione delle onde sonore.

5.2.2 Dati di potenza sonora delle sorgenti

E' sicuramente il punto di partenza di una buona valutazione revisionale, se abbiamo un dato di partenza sbagliato difficilmente troveremo un dato di uscita corretto.

Questo elemento richiede forzatamente la distribuzione spettrale di emissione perché nei processi di propagazione la lunghezza d'onda è la componente che determina i fattori diffrattivi. Nel caso del rumore emesso da infrastrutture stradali abbiamo una serie di linee guida che variano in relazione alla nazione dove sono state sviluppate. Alcune lavorano sullo spettro altre sul valore globale.

La sorgente viene supposta con distribuzione lineare (per alcuni modelli la distribuzione è pseudo-lineare) e quindi abbiamo una propagazione di tipo cilindrico.

I modelli propagativi da cui, inseriti i dati di volume di traffico, velocità e composizione, si ottengono i livelli sonori, sono fondamentalmente empirici e quindi fortemente dipendenti dalla tipologia e dalla manutenzione delle autovetture che in alcune zone potrebbero essere diverse da altre: per esempio in paesi come la Germania abbiamo un numero limitato di piccole cilindrate rispetto al nostro paese.

5.2.3 Dati non considerati nei modelli

Spesso i modelli lavorano su condizioni meteorologiche standardizzate per cui diventa difficile rapportarli alle misure di taratura se queste sono state eseguite in condizioni molto diverse.

5.2.4 Inserimento dati morfologici

Diventa difficile riprodurre la reale morfologia del territorio quando questo possiede una notevole variabilità: è il caso di zone con variazioni altimetriche, dove l'inserimento corretto dei valori di quota della strada e del terreno intorno creano non pochi problemi. L'assorbimento del terreno è anch'esso uno dei parametri delicati difficile da quantificare.

5.2.5 Riferimenti normativi del modello

Questo potrebbe sembrare un problema da poco, spesso siamo portati a pensare che la grande diversità tra una simulazione e l'altra sia fondamentalmente legata all'algoritmo di calcolo

che viene utilizzato dal modello stesso, e invece dobbiamo osservare come esistano grandi differenze a seconda dei riferimenti normativi utilizzati.

Prendiamo ad esempio una situazione semplice:

- strada extraurbana;
- 10.000 veicoli sulle 24 ore di cui 9360 dalle ore 6 alle 22 e 640 dalle ore 22 alle 6;
- 20% di veicoli pesanti di giorno;
- 10% di pesanti di notte;
- velocità veicoli leggeri 70 km/h;
- velocità veicoli pesanti 50 km/h;
- simulazioni eseguite a 4 metri di altezza a distanza di 25, 50 e 100 metri dalla strada.

Nella tabella seguente è possibile osservare i valori ottenuti usando lo stesso modello ma con i riferimenti normativi diversi.

Norma	Diurno a 25 m	Notturno a 25 m	*Diurno a 50 m*	*Notturno a 50 m*	*Diurno a 100 m*	*Notturno a 100 m*
RLS 90	*66.6*	*56.1*	*61.4*	*50.8*	*57*	*46.4*
DIN 18005	*67.6*	*56.8*	*63.6*	*52.8*	*59.1*	*48.3*
Nordic	*70*		*64.8*		*58.4*	
RVS	*64.4*	*58.2*	*60.4*	*54.2*	*56.2*	*50*
NMPB	*72.5*	*61.7*	*67.4*	*56.5*	*60.8*	*49.9*

Riferimenti normativi e confronto con diversi modelli

La ISO 9613 esprime, in condizioni meteorologiche favorevoli, l'accuratezza associabile alla previsione, in relazione alla distanza ed all'altezza del ricevitore come riportato nella tabella sottostante

Altezza media di ricevitore e sorgente (m)	*Distanza (m) 0 < d < 100*	*Distanza (m) 100 < d < 1000*
0 < h < 5	*± 3 dB*	*± 3 dB*
5 < h < 30	*± 1 dB*	*± 3 dB*

Accuratezza delle misure in relazione all'altezza del ricevitore

5.2.6 Scelta dei parametri di calcolo

Anche in questo caso vi possono essere diversità tra i risultati ottenuti modificando i parametri di calcolo del modello, come ad esempio avviene quando si vuole abbreviare i tempi di calcolo e si eseguono delle interpolazioni con una griglia molto estesa.

Il software comunque esegue l'interpolazione e quindi il risultato apparentemente sembra corretto ma in punti specifici le differenze possono essere notevoli.

5.2.7 Calcolo delle incertezze associate alle simulazioni

In questo caso, per quanto sopra esposto, diventa difficile quantificare in modo preciso e numerico i diversi parametri che concorrono a determinare l'incertezza dei valori di uscita di una simulazione matematica. In particolare sono così diversi i comportamenti umani di fronte a queste problematiche che conviene considerare questo parametro come un'incertezza di Tipo B.

Un'analisi delle differenze ottenibili dai diversi modelli matematici fu sviluppata nel 1995 al congresso dell'Associazione Italiana di Acustica" (supplemento degli atti del congresso), la memoria era "INTERCOMPARITION OF TRAFFIC NOISE COMPUTER SIMULATION" – R. Pompoli, A. Farina, P. Fausti, M. Bassanino, S. Invernizzi, L. Menini.

A questo test parteciparono 23 soggetti che attraverso i diversi modelli posseduti fornirono i risultati su situazioni semplici predefinite dagli autori.

Nella figura sottostante riportiamo dal quella memoria i grafici dei risultati su tre posizioni diverse di una simulazione.

Sulle ascisse abbiamo il numero del partecipante al test mentre sulle ordinate il livello previsto in un particolare punto ad una certa distanza dall'infrastruttura viaria.

Come si può osservare le differenze possono essere anche maggiori di 10 dB(A).

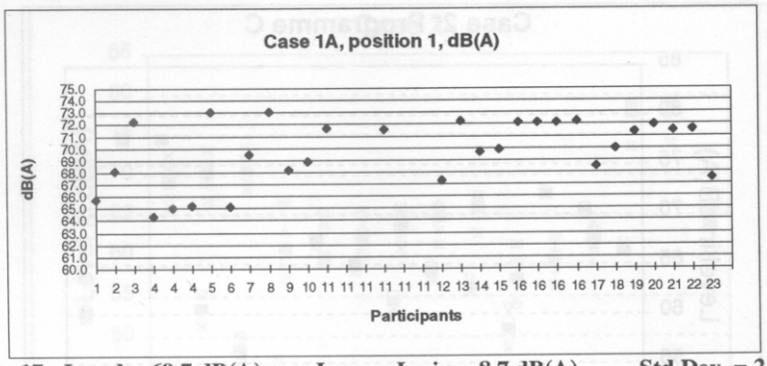


Fig. 17: Lmed = 69.7 dB(A) Lmax - Lmin = 8.7 dB(A) Std.Dev. = 2.66

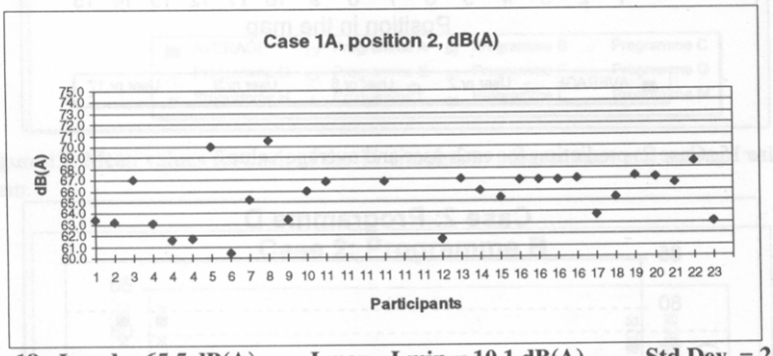


Fig. 18: Lmed = 65.5 dB(A) Lmax - Lmin = 10.1 dB(A) Std.Dev. = 2.47

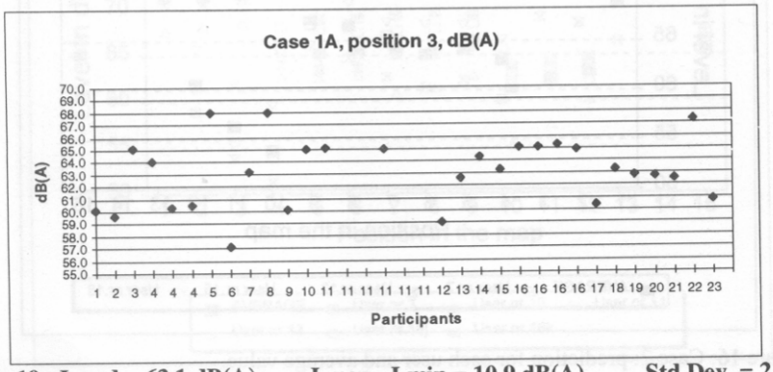


Fig. 19: Lmed = 63.1 dB(A) Lmax - Lmin = 10.9 dB(A) Std.Dev. = 2.69

Grafici: incertezze associate a tre posizioni di simulazione

5.3 MIGLIORAMENTO DELL'ACCURATEZZA

Visti i valori non certo esigui di incertezza associata alle simulazioni è bene porsi l'obbiettivo di comprendere quali possono essere i parametri che ci consentono di migliorare l'accuratezza.

L'elemento principale che ci consente di limitare la variabilità dei risultati delle simulazioni sono le misure di taratura del modello e la veridicità dei dati di potenza sonora delle sorgenti.

Le misure di taratura del modello sono molto più importanti di quanto si possa credere: danno un riferimento metrologico alla simulazione che, come abbiamo visto, resta altrimenti in balia del riferimento normativo usato, del modello matematico acquistato e delle capacità personali del modellista.

Questo vuol dire che più costringiamo il modello ad adeguarsi alla misura acustica di taratura più accurato sarà il risultato ottenuto.

In pratica se la misura viene eseguita vicino ai ricevitori l'incertezza viene a diminuire per arrivare quasi a quella della sola misura: l'errore di cui potrebbe essere affetta sarà presente solo negli scenari futuri in relazione alle inesattezze dei dati delle sorgenti sonore inserite e agli effetti di diffrazione degli schermi che verranno posti.

5.4 QUALI PARAMETRI MISURARE

A parte il rispetto delle richieste del DPCM del 16/3/98 (Tecniche di rilevamento e misurazione dell'inquinamento acustico) può essere importante avere una serie di indicatori statistici e spettrali che ci possono descrivere meglio la situazione di inquinamento acustico.

Avere questi dati su base oraria può in certi casi non essere sufficientemente descrittivo del fenomeno sonoro, e allora sarà necessario utilizzare intervalli di tempo inferiore anche se solo finalizzati ad un approfondimento delle problematiche emissive.

5.5 LA DURATA DELLE MISURE

Il DPCM del 16/3/98 sulle Tecniche di rilevamento, nel caso di traffico stradale, ci indica misure di una settimana e possiamo dire che questo periodo è effettivamente rappresentativo per poter osservare le differenze di rumore emesso nelle giornate festive e prefestive rispetto ai giorni feriali.

Per una situazione di identificazione del clima acustico presente sul territorio, vista la ripetitività già accennata, possono essere sufficienti una misura a 24 ore e alcune a breve termine.

Se le sorgenti sono principalmente di tipo industriale e l'andamento temporale è di tipo stazionario, allora saranno sufficienti un buon numero di misure a breve termine.

5.6 IL LIVELLO DI ACCURATEZZA

Per la modellazione della situazione esistente, il livello di accuratezza, seguendo queste indicazioni, migliora fino a portarsi vicino all'accuratezza della sola misura. E' chiaro che quando si affrontano le simulazioni di stato futuro, con l'introduzione di sorgenti specifiche e con gli elementi di bonifica acustica (dossi o barriere), si possono introdurre nuove incertezze che vanno a peggiorare il valore di accuratezza globale.

La differenza in questa situazione si può avere su come un modello calcola, a differenza di un altro, le attenuazioni delle barriere. Analizzando le relazioni di Fresnel si può dire che l'ampiezza di errore dovrebbe essere limitata entro 1 dB(A), il che ci porta verso un'incertezza totale sulla simulazione pari a

$$u(s) = 2.88 \text{ dBA}$$

Questo valore è la migliore accuratezza ottenibile ma, ribadiamo, solo nelle seguenti condizioni:

- strumentazione a norma tarata (presso un Centro Accredia) possibilmente negli ultimi sei mesi;
- misura di almeno 24 ore in vicinanza dei recettori più esposti;
- ulteriori misure di taratura di durata inferiore;
- morfologia non troppo complicata;
- condizioni atmosferiche stabili;
- corretto valore dello spettro di potenza delle diverse sorgenti modellizzate;
- situazione di normalità delle sorgenti in gioco.

Nel momento stesso in cui la misura non viene eseguita in prossimità dei recettori, per motivi di diverso genere, non ultimo l'impossibilità di accedere in proprietà private, il valore di incertezza sulla situazione preesistente può arrivare a 7- 8 dB(A).